บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันได้มีการใช้รถเป็นจำนวนมากซึ่งพลังงานน้ำมันก็กำลังจะหมดไป จึงทำการสร้างวงจรที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานอื่นและปัจจุบันก็ได้มีรถไฟฟ้ามากมายที่เกิดปัญหาในการบำรุงรักษาวงจรเหล่านี้ที่มีราคาสูง เช่น รถกอล์ฟ จึงทำการประดิษฐ์วงจรที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์แบบ4ควอตแดนซ์ที่มีราคาถูก การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ4ควอตแดนซ์มีวัตถุประสงค์ในการขับและกลับทางหมุนและเบรก หรือหยุดทำงาน การเบรกด้วยการใช้วิธี Regenerative เป็นการเบรกที่มีประสิทธิภาพมาก เนื่องจากการใช้เส้นแรงแม่เหล็กย้อนกลับ ทำให้เกิดแรงบิดจากตัวมอเตอร์เวลาการหยุดจะขึ้นอยู่กับคาบเวลาคงที่ของมอเตอร์ และระดับของตัวควบคุมตัวสวิตชิ่ง ในควอตแดนซ์ที่2 การเบรกนี้จะยิ่งช่วยคืนพลังงานของมอเตอร์ไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์อีกด้วย

1.1 ความสำคัญของปัญหา

1. วงจรขับเคลื่อนของรถกอล์ฟมีความซับซ้อน
2. ลดต้นทุนในการบำรุงรักษาถ้าสามารถสร้างชุดขับเคลื่อนแบบพื้นฐาน
3. ศึกษาเทคโนโลยีและกลไกของรถกอล์ฟที่ใช้จริง
4. ในกรณีที่ชุดขับเคลื่อนชำรุด มักจะต้องเปลี่ยนทั้งชุดซึ่งมีราคาสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

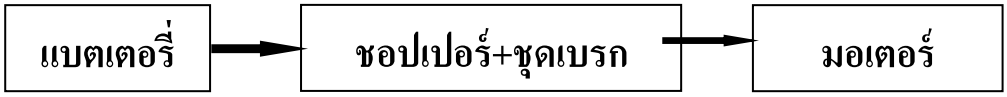
1. เพื่อศึกษากลไกการขับเคลื่อนของรถกอล์ฟ
2. เพื่อสร้างตัวขับเคลื่อนโดยใช้วงจร ชอปเปอร์

3. เพื่อประยุกต์วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาสร้างตัวขับเคลื่อน
4. เพื่อทดแทนตัวขับเคลื่อนเดิมและพัฒนาให้ถูกลง

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. สร้างตัวขับเคลื่อนมอเตอร์รถด้วยวงจร ชอปเปอร์
2. ติดตั้งตัวเบรกแบบ Regenerativeด้วยวงจร ชอปเปอร์
3. ใช้โครงสร้างของรถกอล์ฟที่ใช้จริง
4. ขับด้วยสัญญาณ PWM ขนาด10 kHZ
5. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 2000 วัตต์

1.4 โครงสร้างของโครงงาน



ภาพที่ 1.1 รถกอล์ฟ

1.5 ประโยชน์ของโครงงาน

1. สามารถลดปัญหาการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจำพวกน้ำมันและก๊าซธรรมชาติได้
2. สามารถแก้ไขปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นบนท้องถนนได้
3. ได้ความรู้เรื่องวงจรที่สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์กำลังงานสูงๆได้
4. สามารถเป็นแนวทางในการสร้างเพื่อนพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วงจรควบคุมเป็นวงจรที่ใช้เปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันระดับหนึ่งไปเป็นอีกระดับหนึ่ง การนำไปใช้งานส่วนมากจะเปลี่ยนแรงดันเพื่อจ่ายให้กับอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง เพื่อช่วยในการเริ่มเดินและควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และยังสามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เปลี่ยนแปลงแรงดันได้สะดวก

หลักการเบื้องต้นของวงจร สามารถพิจารณาจากวงจรพื้นฐานในวงจรประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, สวิทซ์, โหลดเป็นความต้านทานวงจรที่ใช้งานจริงจะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์, เอสซีอาร์ (SCR), มอสเฟต(MOSFET)และไอจีบีที (Insolated gate bipolar Transistor) ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์ แต่ในโครงงานนี้จะใช้ มอสเฟต (mosfet) เป็นสวิทซ์ซึ่งตอบสนองความถี่ได้สูง

เมื่อปิดสวิทซ์ (Closed Switch) แรงดันที่โหลดจะเท่ากับแรงดันที่แหล่งจ่าย เมื่อเปิดสวิทซ์ (Open Switch) แรงดันที่โหลดจะเท่ากับศูนย์ แรงดันเฉลี่ยที่โหลดจะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ปิดสวิทซ์และเปิดสวิทซ์ จึงเรียกวิธีนี้ว่า “ชอปเปอร์” (Chopper) หรือ D.C.-to-D.C. Controller หรือ Time Ratio Controllers ถ้าช่วงระยะเวลาที่สวิทซ์เปิด-ปิดเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน ก็จะทำให้แรงดันที่โหลด (V_0) และกระแสที่โหลดเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีค่าแรงดันเฉลี่ย (Average Voltage) จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่าย ดังนี้

T_{on} = ระยะเวลาที่สวิทซ์ปิด

T_{off} = ระยะเวลาที่สวิทซ์เปิด

$T = T_{on} + T_{off}$ = ระยะเวลาในหนึ่งไซเคิ้ล

$$V_{o(ave)} = \frac{1}{T}\int_0^2 V_s = \frac{T_{on}}{T} V_s \qquad (2.01)$$

$$V_{o(ave)} = KV_s \qquad (2.02)$$

ซึ่งค่า $K = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$ = อัตราส่วนระยะเวลาเปิดและเวลาปิด = dutycycle

$$V_{rms} = \sqrt{(\frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_s^2(t)dt)}$$

$$= V_s\sqrt{K} \qquad (2.03)$$

ลักษณะการเปิด-ปิดสวิทซ์ในวงจรควบคุม สามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะคือ

1.) T_{on} เปลี่ยนแปลง T_{off} และ เปลี่ยนแปลง แต่ T คงที่ เรียกการทำงานลักษณะนี้ว่า "วิธีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์" (Pulse Modulation) แรงดันที่โหลดจะลดลงเมื่อ T_{on} ลดลง

2.) T_{on} คงที่ และ T_{off} เปลี่ยนแปลง แต่เปลี่ยนแปลง เรียกการทำงานลักษณะนี้ว่า "วิธีการเปลี่ยนแปลงความถี่" (Frequency Modulation) แรงดันที่โหลดจะลดลงเมื่อ T_{off} มากขึ้น

3.) ลักษณะการทำงานของการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์และเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งแบ่งได้กรณี2คือ

3.1) T_{on} เปลี่ยนแปลง T_{off} และ คงที่ แต่ T เปลี่ยนแปลง

3.2) T_{on} เปลี่ยนแปลง T_{off} และ เปลี่ยนแปลง และ T เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาวงจร จะเห็นว่าจะมีแรงดันเอาท์พุทเป็นภาพ Wave Form จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างไร วิธีแก้ก็คือ สวิทซ์ที่ใช้จะต้องใช้กับสัญญาณที่มีความถี่สูงๆจึงจะมองไม่ออกว่าเป็น Wave Form

2.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Motor Drive)[2]

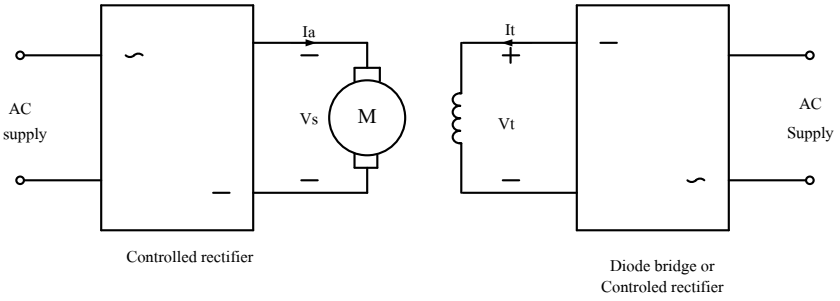
การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นกระบวนที่จะควบคุมให้มอเตอร์ทำงานตามที่เราต้องการหรือตามกระบวนการต่างๆ ข้อดีของการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็คือมีความคงทนและสามารถควบคุมได้ง่าย เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถือว่าเป็นระบบที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการควบคุมจะเป็นการควบคุมระดับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์

เป็นส่วนใหญ่ แม้ว่าข้อด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีขนาดใหญ่กว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับก็ตามการประยุกต์อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงช่วยให้การควบคุมมอเตอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบดั่งเดิมซึ่งมีค่าสูญเสียทางพลังงานสูง เมื่อเป็นเช่นนี้ ตัวแปลงผัน จะเป็นอุปกรณ์สำคัญในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะมีใช้ 2 ชนิด คือ

1.ตัวแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC – DC Converter) โดยใช้อุปกรณ์ไทริสเตอร์เป็นอุปกรณ์สวิทช์ทั้งระบบ 1 เฟส และ 3 เฟส

2.ตัวแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง(DC – DCConverter) หรือ DC chopper จะเป็นการใช้ Power MOSFET และ IGBT เป็นอุปกรณ์สวิทช์ทั้งในส่วนของการขับเคลื่อนและการหยุดหมุนหรือการเบรก

จากภาพที่ 2.1 แสดงถึงวงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้งสองชนิดดังที่กล่าวแล้ว โดยหลักการของการขับเคลื่อนจะเป็นการควบคุมการจ่ายกำลังและการปรับความเร็ว ซึ่งเราสามารถปรับได้ทั้งสวนของอาร์เมเจอร์และวงจรสนามแม่เหล็ก ดังนั้นตัวแปลงผันเราจึงสามารถติดตั้งทั้งในวงจรอาร์เมเจอร์และวงจรสนามแม่เหล็ก



ภาพที่ 2.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวแปลงผัน

(ก.) แบบ AC-DC Converter หรือ Phase Controlled

(ข.) แบบ DC-DCConverter หรือ DC Chopper

สมการพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$e_g = Ki_f i_a \tag{2.04}$$

$$vf = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{2.05}$$

$$va = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_g \tag{2.06}$$

$$e_g = ki_f i_a \tag{2.07}$$

$$Td = J \frac{dw}{dt_f} + B\omega + T_L \tag{2.08}$$

ในสภาวะคงตัว (Steady State)

$$vf = R_f i_f \tag{2.09}$$

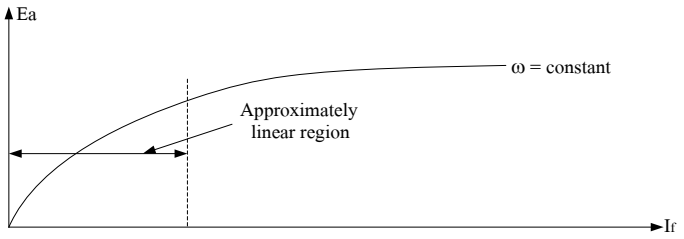
$$E_g = K\omega i_f \tag{2.10}$$

$$Va = R_a I_a + E_g \tag{2.11}$$

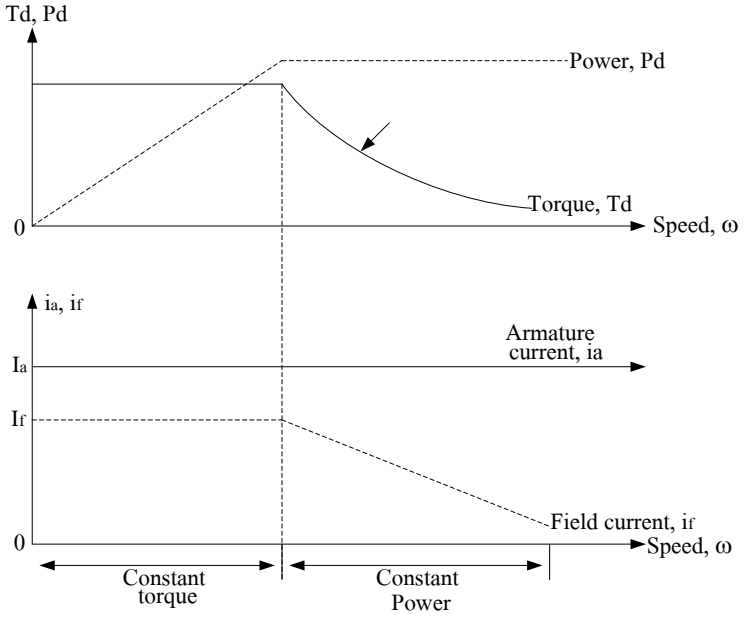
$$T_d = K_f I_a I_f \tag{2.12}$$

สมการควบคุมความเร็ว

$$\omega = \frac{V_a - R_a I_a}{K_v I_f} \tag{2.13}$$



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสนามและการสร้าง Back emf



ภาพที่ 2.3 คุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบ เมื่อควบคุมแรงดันอาร์เมเจอร์และควบคุมแรงดันวงจรสนามแม่เหล็ก

2.1.1 สมการพื้นฐานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series Motor)

$$E_g = K\omega I_a \tag{2.14}$$

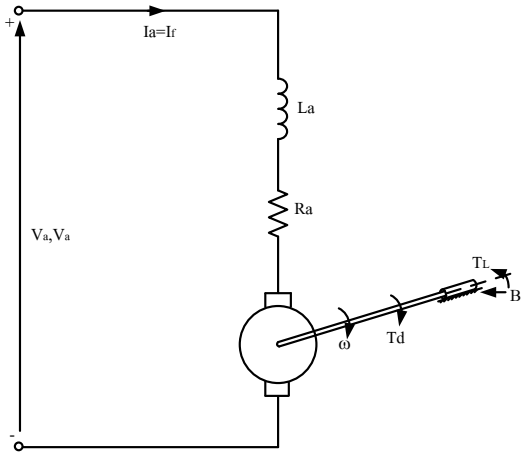
$$V_a = (R_a + R_f)I_a + E_g$$

$$= (R_a + R_f)I_a + K\omega I_f$$

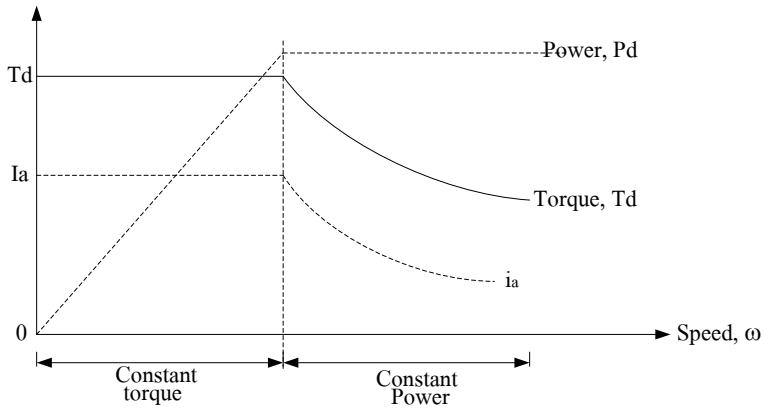
$$T_d = K_f I_a I_f \tag{2.15}$$

สมการควบคุมความเร็ว

$$\omega = \frac{V_a - (R_a + Rf)I_a}{K_v i_f} \tag{2.16}$$



ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงแบบอนุกรม (Series Motor)



ภาพที่ 2.5 คุณสมบัติของแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

$$I_{rated} = 15 \times 746/220$$
$$= 50.87A.$$

2.1.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ในโหมดต่างๆ

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแยกเป็นโหมดๆ ได้ดังนี้

- Motoring

การขับเคลื่อนให้แรงดันที่ขั้วมากกว่าแรงดันที่สร้างขึ้นหรือแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ (Back Emf :Eg) ค่ากระแสอาร์เมเจอร์และกระแสสนามจะเป็นบวก แรงบิดของมอเตอร์เป็นบวก

- Regenerative Braking

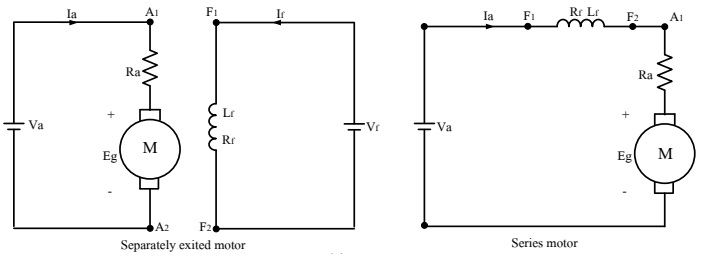
มอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะสร้างแรงดัน Eg มากกว่าแรงดันที่ขั้วหรือแรงดันที่แหล่งจ่าย กระแสอาร์เมเจอร์จะเป็นลบ กระแสสนามแม่เหล็กจะเป็นบวก พลังงานจะจ่ายกลับให้แหล่งจ่าย

- Dynamic Braking

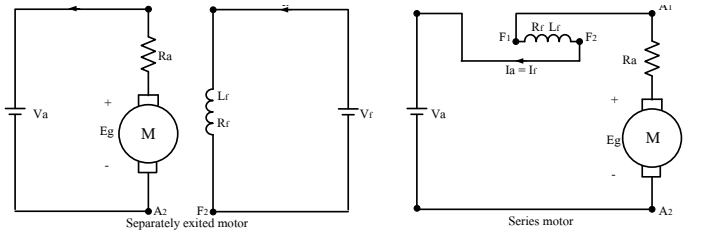
ทำงานคล้ายกับ Regenerative แต่จะมีค่าความต้านทานในการรับพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พลังงานจะสูญเสียไปที่ค่าความต้านทาน การจะหยุดได้มากน้อยขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน

- Plugging

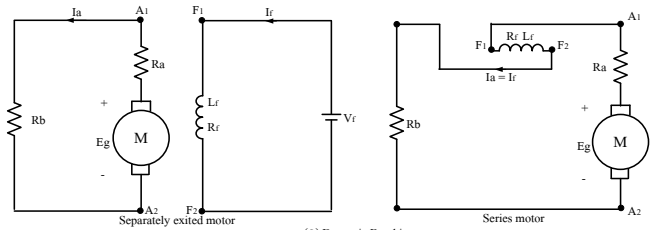
เป็นชนิดหนึ่งของการหยุดทำงานขั้วของมอเตอร์ที่ต่ออาร์เมเจอร์จะกลับทางกับขั้วที่แหล่งจ่าย แรงดันจ่ายแหล่งจ่ายจะจ่ายให้กับมอเตอร์ Eg จะมิทิศทางเดียวกับแรงดันที่แหล่งจ่าย กระแสจะไหลย้อนกลับมาหาแหล่งจ่าย ขณะที่กระแสสนามยังเป็นบวก



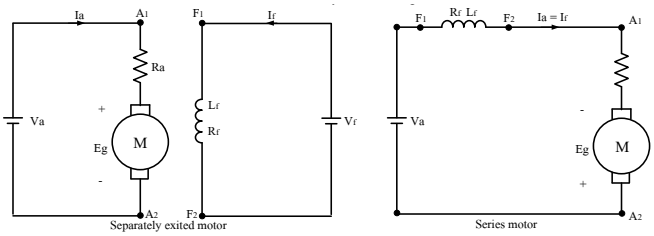
ก.



ข.



ค



ง.

ภาพที่ 2.6 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและการเบรกแบบต่างๆ

(ก.) Motoring (ข.) Regenerative Braking (ค.) Dynamic Braking

(ง.) Plugging

2.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรชอปเปอร์ [1]

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยAC-DC Converter ซึ่งใช้ไทริสเตอร์เป็นตัวสวิทช์จะมีข้อดี เนื่องจากไทริสเตอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่ค่อนข้างทนทาน และทนค่ากระแสโหลดสูงๆ ได้ และความถี่ที่ใช้ในการสวิทช์จะเป็นความถี่ต่ำ เช่น 50-60 Hz. ดังนั้น ปัญหาการเกิด dv/dt และ di/dt จะไม่ค่อยเกิดปัญหากับตัวแปลงผันชนิดนี้ และอีกประการหนึ่ง การแปลงจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงได้โดยตรง แต่ข้อเสียของการใช้ตัวแปลงผันชนิดนี้อยู่ที่มุมจุดชนวนต่ำๆ จะไม่เกิดความต่อเนื่องของกระแส และความเป็นเชิงเส้นในการควบคุมแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์

การแก้ปัญหาในด้านการควบคุมแรงดัน เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องของกระแสโหลด จะทำได้โดยการควบคุมแรงดันด้วยการควบคุมการเปิดปิดของสวิทช์ ที่ความถี่สูง ซึ่งจะทำให้ความเป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงมีมากขึ้นวงจรที่ใช้คือDC-DC Converter หรือเรียกว่าDC Chopper ประโยชน์การใช้วงจรชอปเปอร์สามารถต่อได้โดยตรงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เช่น แบตเตอรี่ จากรถไฟฟ้า เป็นต้น และยังสามารถเบรกด้วยวิธี Regenerative ทำให้พลังงานย้อนกลับ

ไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงได้อีกด้วย การใช้DC Chopper เหมาะสำหรับการขับเคลื่อนแบบหลายควอดแดนท์

สมการ

$$V_a = kV_S \tag{2.17}$$

$$P_a = kV_S I_a \tag{2.18}$$

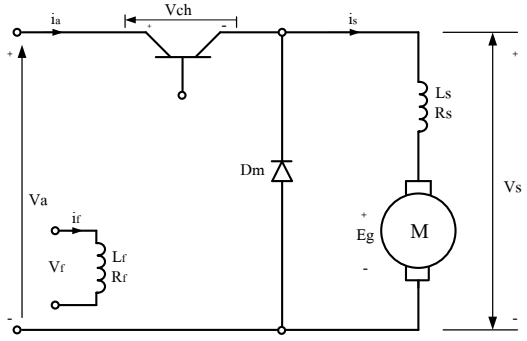
$$I_S = kI_a \tag{2.19}$$

$$R_{eq} = \frac{V_S}{I_S} = \frac{V_S}{kI_a} \tag{2.20}$$

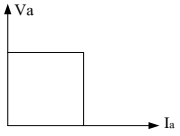
$$\Delta I_{\max} = \frac{V_S}{R_m} \tanh \frac{R_m}{4fL_m} \tag{2.21}$$

$$R_m = R_a + R_{serier} \tag{2.22}$$

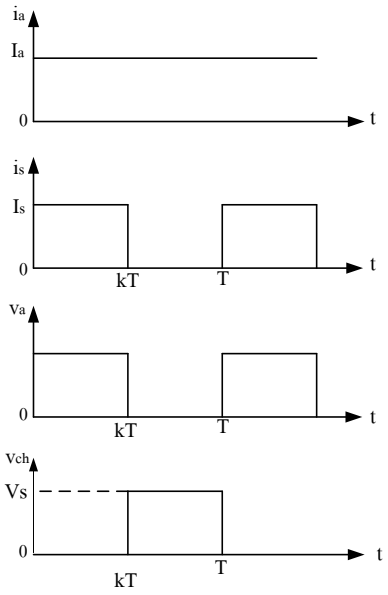
$$L_m = L_a + L_f + L_{serier} \tag{2.23}$$



ก.



ข.

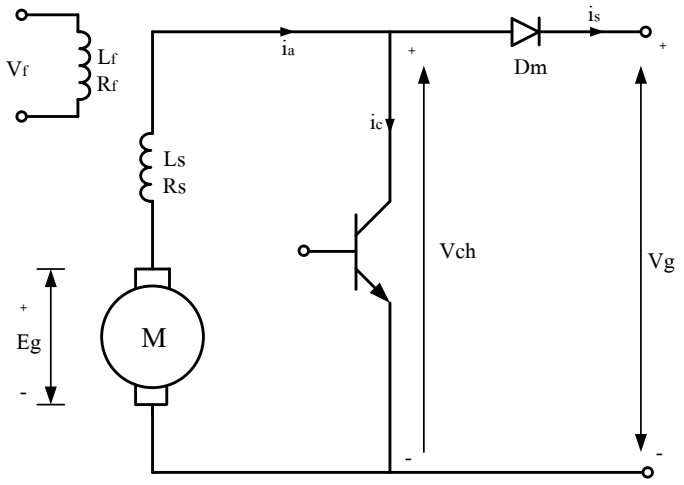


ค.

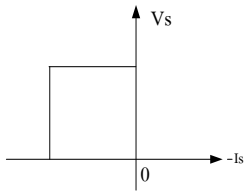
ภาพที่ 2.7 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้วงจร DC Chopper 1st Quadrant

(ก.) วงจร (ข.) ควอแดรนท์

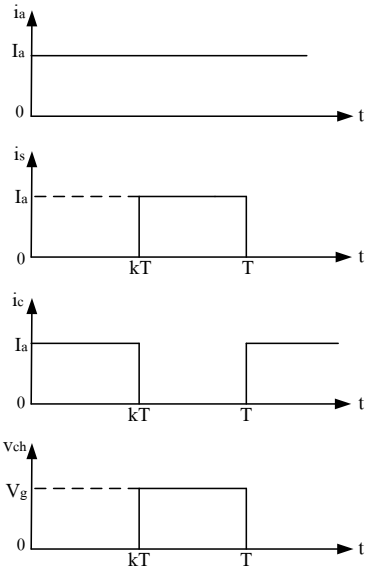
(ค.) รูปคลื่นแรงดันและกระแส



ก.



ข.



ค.

ภาพที่ 2.8 การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกโดยใช้วงจร DC Chopper
(ก.) วงจร (ข.) ควอแดนซ์ (ค.) รูปคลื่นแรงดันและกระแส

2.2.1 การควบคุมเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Regenerative Breaking of DC Separately Excited) [1.]

จากภาพที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในควอตแดรนท์ที่ 2 และรูปคลื่นของแรงดันและกระแส เมื่อมอเตอร์ยังหมุนอยู่ ถ้าทรานซิสเตอร์เปิด(Turn on) แรงดันที่มอเตอร์จะสูงกว่าแรงดันที่ขั้นกระแสจะไหลออกจากมอเตอร์ และมอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเรียกว่า การ Regenerative การเบรกด้วยวิธี Regenerative นี้จะใช้ได้ผลอย่างยิ่งกับมอเตอร์ที่ต่อแบบกระตุ้นแยก เพราะวงจรขดลวดสนามถูกต่อแยกส่วน สามารถควบคุมได้อย่างอิสระ เวลาในการลดลงของการหยุดนี้ขึ้นอยู่กับความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์

สมการแรงดันเอาท์พุท

$$V_{ch} = (1-k)V_S \tag{2.24}$$

$$P_a = (1-k)V_S I_a \tag{2.25}$$

แรงดัน Back emf

$$E_g = K_v I_f \varpi \tag{2.26}$$

$$= V_{ch} + R_m I_a$$

$$= (1-k)V_S + R_m I_a$$

$$R_{eq} = \frac{V_S}{I_S} = \frac{V_S}{I_a}(1-k) + R_m \tag{2.27}$$

จากการควบคุมการเบรก โดยการปรับค่า Duty Cycle ทำให้ความต้านทานสมมูลเปลี่ยนแปลงไป ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจะอยู่ในย่านความเร็วต่ำสุดของมอเตอร์

$0 \le K_v \omega_{\min} I_f \le R_m I_a$

$$Eg = K_v \omega_{\min} I_f = R_m I_a \tag{2.28}$$

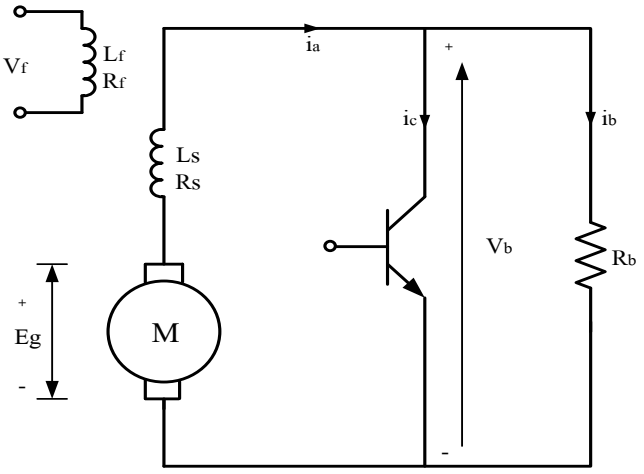
$$\omega_{\min} = \frac{R_m I_a}{K_v I_f} \tag{2.29}$$

$$K_v \omega_{\max} I_f - R_m I_a = V_S \tag{2.30}$$

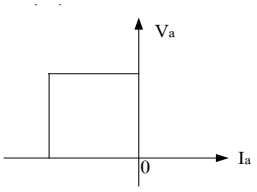
$$\omega_{\max} = \frac{V_S}{K_v I_f} + \frac{R_m I_a}{K_v I_f} \tag{2.31}$$

2.2.2 การควบคุมเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบพลวัต (Dynamic Brake)

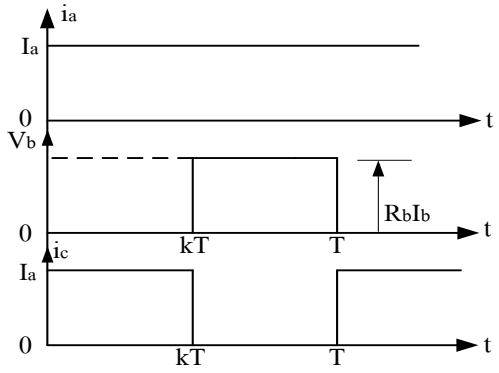
การเบรกชนิดนี้เป็นการเบรกแบบไดนามิค โดยใช้ Rheostat พลังของการเบรกจะถ่ายไปที่ Rheostat วิธีนี้จะนิยมใช้ในการเบรกของรถไฟฟ้า พลังงานของการเบรกจะเกิดเป็นความร้อนจะสามารถควบคุมได้ดีกว่าแบบ Regenerative Braking



ก.



ข.



ค.

ภาพที่ 2.9 การเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Dynamic Braking
(ก.) วงจร (ข.) ควอแดนซ์ (ค.) รูปคลื่นส่วนต่าง ๆ

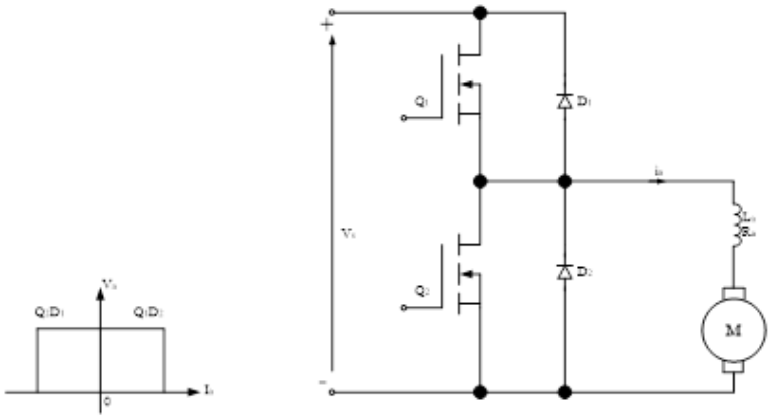
$$I_b = I_a(1-k) \tag{2.32}$$

$$V_b = R_b I_a(1-k) \tag{2.33}$$

$$R_{eq} = \frac{V_b}{I_a} = R_b(1-k) + R_m \tag{2.34}$$

$$P_b = I_a^2 R_b(1-k) \tag{2.35}$$

2.2.3 การขับเคลื่อนแบบ 2 ควอแดรนท์ [1.]



ก. ข.

ภาพที่ 2.10 การขับเคลื่อนและการเบรกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมโดยใช้วงจร DC Chopper 2nd Quadrant

(ก.) ขอบเขตทิศทางกระแสและแรงดัน

(ข.) วงจร 2 ควอตแดนซ์

2.3 ทฤษฎีของวงจรชอปเปอร์[1]

เป็นวิธีการที่ใช้ในการควบคุมแรงดันไฟตรงแบบควบคุมการตัดต่อ(DC-chopper) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงมีน้ำหนักเบาขนาดเล็กและตอบสนองได้รวดเร็วทั้งยังสามารถคืนพลังงานกลับได้ ตัวอย่าง เช่น งานประเภทลากจูงยานพาหนะที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่าย เช่น รถ Folklift รถลาก (trolley) และงานควบคุมตำแหน่งซึ่งใช้มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

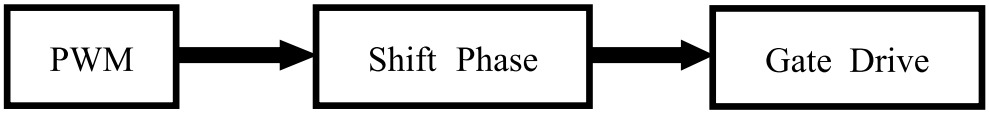
การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาท์พุท โดยวิธี DC chopper สามารถทำได้ 3 วิธี

1. การเปลี่ยนแปลงความถี่ในการตัด แต่ช่วงความกว้างคงที่เรียกว่า Frequency modulation
2. การเปลี่ยนแปลงความถี่ในการตัดแต่ช่วงความถี่คงที่เรียกว่าpwm
3. การเปลี่ยนแปลงทั้งความถี่และช่วงกว้างเรียกว่า Pulse width and Frequency modulation

ความถี่ที่ใช้ในการตัดต่อแรงดันมีผลต่อการไหลของกระแสอาร์เมเจอร์ต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง และไม่ควรมีค่ามากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดค่า Switching Loss สูง โดย DC chopper ที่สร้างขึ้นมี คุณสมบัติดังนี้

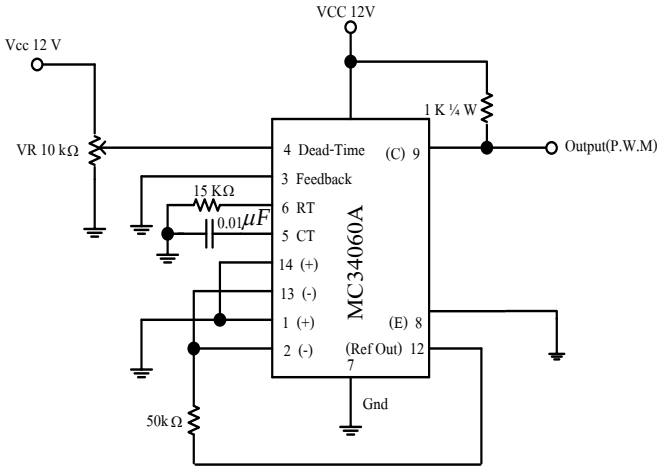
-สามารถให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าเป็นบวก ศูนย์ และลบ กระแสสามารถไหลได้ทั้งทิศทาง เพื่อให้ทำงานครบทั้ง 2 ควอดแดนซ์
-ค่าแรงดันเฉลี่ยเอาท์พุทของ DC chopper จะเปลี่ยนอย่างเชิงเส้นกับแรงดันควบคุมอินพุท โดยไม่ขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่อกับมอเตอร์
-กระแสอาร์เมเจอร์มีค่าา factor Form ดีขึ้นซึ่งช่วยลดการแกว่งของความเร็วและแรงบิดจาก มอเตอร์

2.4 โครงสร้างการทำงาน



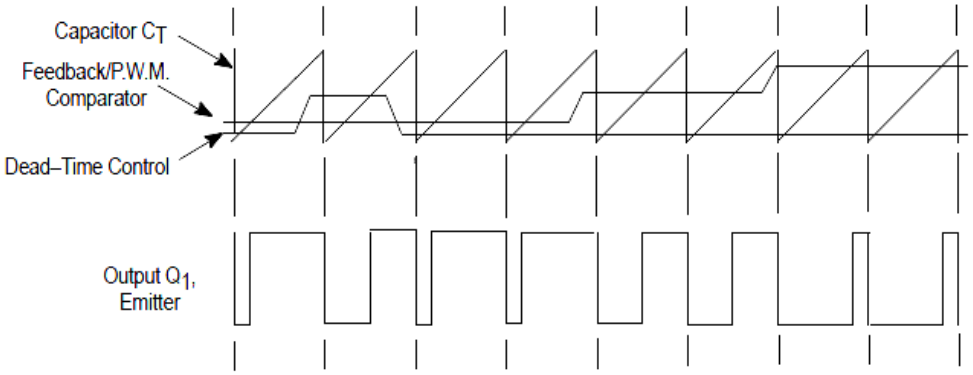
ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของวงจร

2.5 วงจร PWM [3]



ภาพที่ 2.12 วงจรสร้างสัญญาณ PWM

สัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็มที่นำมาใช้ในโครงงานนี้มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่มีความถี่คงที่ สามารถปรับค่าดิวตี้ไซเคิลได้ การสร้างสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็มเกิดจากการนำระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (U_{IN}) ซึ่งเป็นสัญญาณอินพุท มาเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปฟันเลื่อยดังภาพที่ 2-13 สัญญาณเอาท์พุทที่ได้หลังจากการเปรียบเทียบกันระหว่าง 2 สัญญาณ จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีดิวตี้ไซเคิล แปรผันตามระดับของสัญญาณอินพุท (U_{IN})

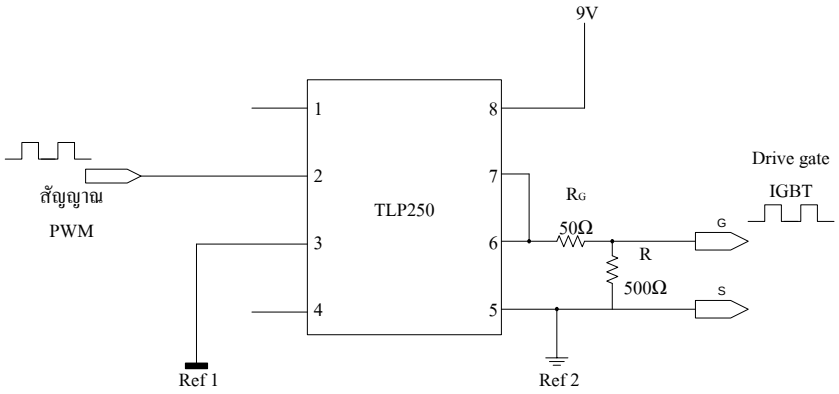


ภาพที่ 2.13 แสดงรูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุทของ Pulse Width Modulation (PWM)

วงจรนี้เป็นวงจรที่ใช้หลักการควบคุมแบบ PWM โดย IC จะเป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ ทริก ให้กับ T_1และT_2 เพื่อไป Drive ชุดวงจรขับมอสเฟทในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟตรงขนาด 48 V , 3000 w วงจรสร้างสัญญาณ (PWM) แสดงดังภาพที่ 2-12

2.6 วงจรขับเกทมอสเฟต[4]

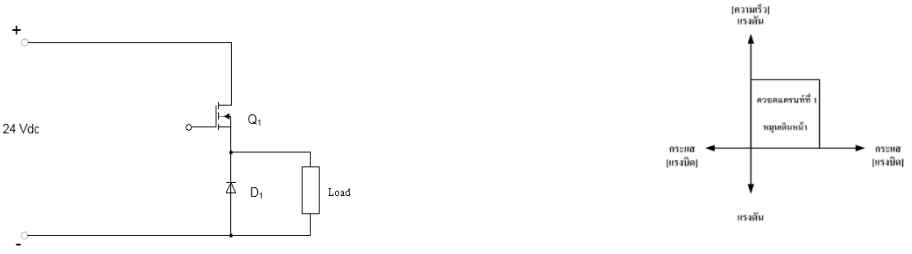
สัญญาณ PWM ที่ผ่านการมอดูเลตตามความกว้างของพัลส์มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม สัญญาณนี้ถูกส่งไปยังวงจรสร้างสัญญาณขับนำเกท ด้วยไอซีสร้างสัญญาณขับนำเกทเบอร์ TLP250 เพื่อควบคุมการทำงานของมอสเฟท โดยออกแบบวงจรขับเกทตามภาพที่ 2.14 และนำวงจรขับเกทที่ออกแบบนี้ไปใช้กับวงจรชอปเปอร์แบบ 1 ควอตแดรนท์ และ 2 ควอตแดรนท์



ภาพที่ 2.14 วงจรทริกเกทโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250

จากภาพที่ 2.14 แสดงการต่อวงจรขับนำเกทของไอซี TLP250 ซึ่งแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจะต้องเป็นคนละชุดกับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงสัญญาณพีดับเบิ้ลยูเอ็ม และขาลบของไฟเลี้ยงทั้งสองแหล่งจ่าย(Ref1 และ Ref2) จะไม่ต่อถึงกัน ส่วนที่สำคัญของวงจรนี้ส่วนหนึ่งคือ R_G ซึ่งจะทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสที่จะไปขับเกทของมอสเฟตผลของการจำกัดกระแสนี้ จะทำให้หน่วงเวลาการเปิดของมอสเฟตจะทำให้ลดสัญญาณการพุ่งเกิน(Overshoot) โดยค่าความต้านทานน้อย จะทำให้เกิดการพุ่งเกินมากที่ตำแหน่งของขาขึ้นของสัญญาณจากสภาวะปิดเป็นเปิด แรงดันชอปเปอร์ที่โหลดได้รับและแรงดันพุ่งเกินนี้ จะมีผลต่อการเกิดสัญญาณรบกวน แต่ถ้าหากให้ค่าความต้านทานมากเกินไป จะทำให้มีพลังงานสะสมที่ขาเกทมาก อาจทำให้มอสเฟตเสียหายได้

2.7 วงจรชอปเปอร์แบบ 1 ควอตแดนซ์ [1]

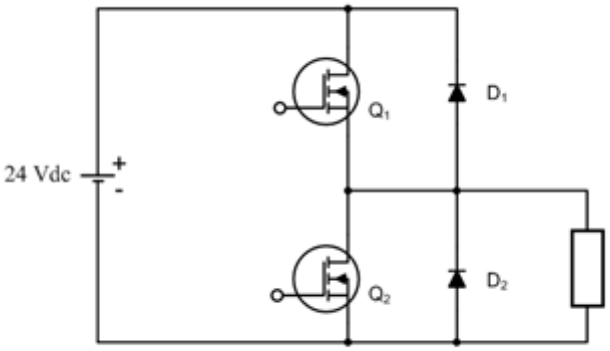


ก. วงจรพื้นฐาน ข. การทำงานที่ควอตแดรนท์ที่ 1

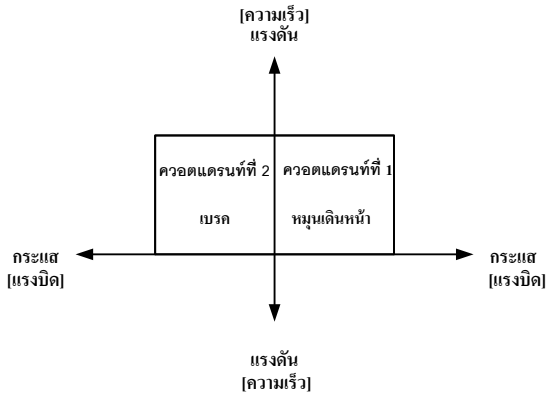
ภาพที่ 2.15 ลักษณะของวงจรชอปเปอร์แบบ 1 ควอตแดนซ์

การทดลองโหลดในควอตแดนซ์ที่ 1 ใช้หลักการชอปเปอร์ โดยจะมีมอสเฟต เป็นตัวเปิด – ปิดวงจรตามภาพที่ 2.15(ก.) เมื่อมอสเฟตนำกระแส โหลดจะได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 48 โวลต์ และเมื่อมอสเฟตหยุดนำกระแส พลังงานที่สะสมไว้ในตัวเหนี่ยวนำของโหลดจะไหลผ่านไดโอด(D1) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Free Wheeling Diode

2.8 วงจรชอปเปอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์[1]



ก. วงจรพื้นฐาน



ข. การทำงานที่ควอตแดนซ์ที่ 2

ภาพที่ 2.16 ลักษณะของวงจรชอปเปอร์ แบบ 2 ควอตแดนซ์

(ก.) วงจรพื้นฐาน

(ข.) การทำงานที่ควอตแดนซ์ที่ 2

เนื่องจากการออกแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงในที่นี้เป็นแบบ 2 ควอตแดนซ์โดยกำหนดให้ มอสเฟต (Mosfet) ทั้งสองตัวทำงานสลับกัน ดังนั้น เฟสของแรงดันควบคุม มอสเฟต (Mosfet) แต่ละตัวจะมีโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันได้ชั่วขณะทำให้เกิดลัดวงจรได้

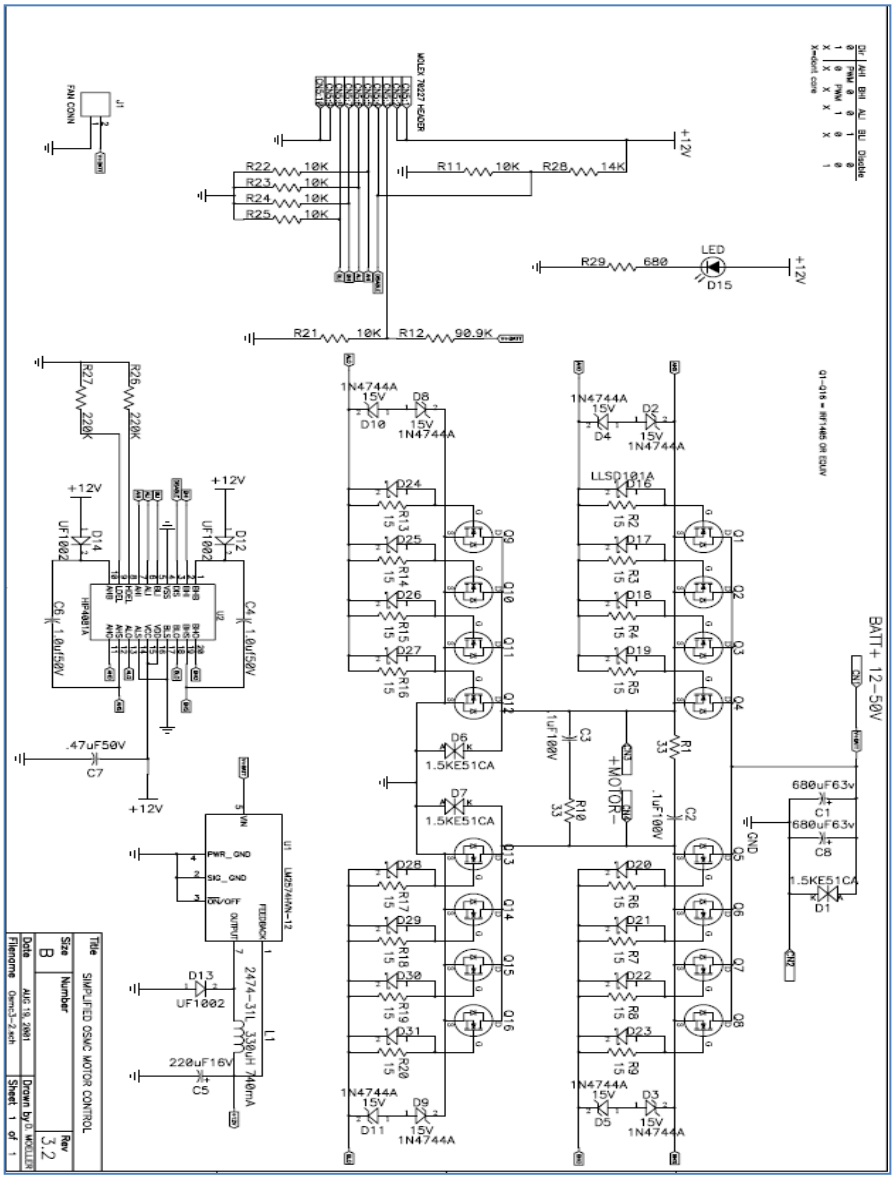
2.9 ลักษณะของมอเตอร์และคุณสมบัติของมอเตอร์

ภาพที่ 2.17 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 3000 w

มอเตอร์ดังภาพที่ 2.17 เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กับรถไฟฟ้า,รถจักรยานไฟฟ้าและรถกอล์ฟ มีขนาด 3000 w เป็นมอเตอร์แบบอนุกรม มีความเร็วรอบ 2800 รอบต่อนาที แรงดัน 48 Vdc

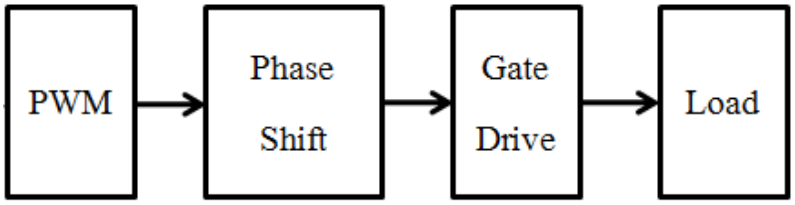
บทที่ 3

การออกแบบวงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 3.1 วงจรชอปเปอร์ที่ใช่ในรถกอล์ฟจริง

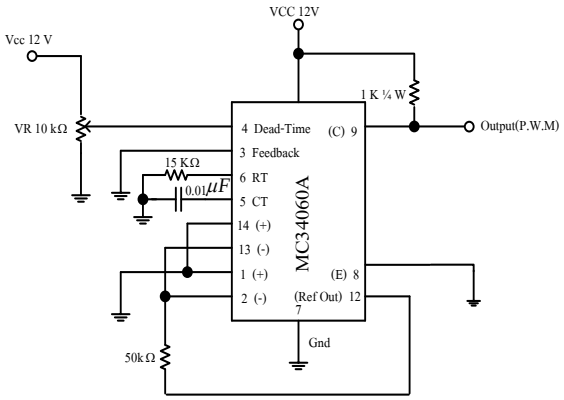
3.1 การออกแบบโครงงาน



การออกแบบโครงงานการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสตรงแบบ 4 ควอตแดนซ์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

- วงจรกำเนิดสัญญาณ พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.)
- วงจรการเลื่อนเฟส (Phase shift)
- วงจรขับเกท มอสเฟต (Gate driver circuit)

3.2 วงจร PWM (Pulse Width Modulation)



ภาพที่ 3.2 วงจร PWM

เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่และควบคุมความกว้างของสัญญาณ ตามค่าคำสั่งที่ผ่านให้วงจร กำหนดให้คำสั่งเท่ากับค่า V_s ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเปรียบเทียบกับ

สัญญาณรูปฟันเลื่อยที่ที่ถูกสร้างขึ้นภายในวงจร พี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) หน้าที่สำคัญของวงจรพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) คือสร้างสัญญาณรูปฟันเลื่อยและเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยกับระดับแรงดัน V_s จากรูปที่แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสอง ได้สัญญาณเอาท์พุทเป็นรูปพัลส์ ที่เปลี่ยนแปลงค่า Duty cycle ตามผลการเปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุทนี้ จะนำไปผ่านวงจรขับเกทของมอสเฟต เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดต่อไป ส่วนสัญญาณ Dead time Control ที่เห็นเป็นสัญญาณอินพุทอีกขาหนึ่ง MC34060AD มีไว้ใช้ในกรณีที่ต้องการควบคุม Dead time โดยคุณสมบัติเดียวกับขาV_s

3.2.1 การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณ PWM

วงจรกำเนิดสัญญาณพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) นี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ MC34060AD ซึ่งมีวงจรกำเนิดสัญญาณฟันเลื่อยและวงจรเปรียบเทียบอยู่ภายใน การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการกำเนิดความถี่กำหนดได้ดังนี้

กำหนดให้

f_{ocs} เท่ากับ ความถี่ของสัญญาณพัลส์

R_T, C_T เท่ากับ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

$$R_T = \frac{1.1}{f_{ocs} C_T} \tag{3.1}$$

3.2.2 การคำนวณหาค่า C_T และ R_T

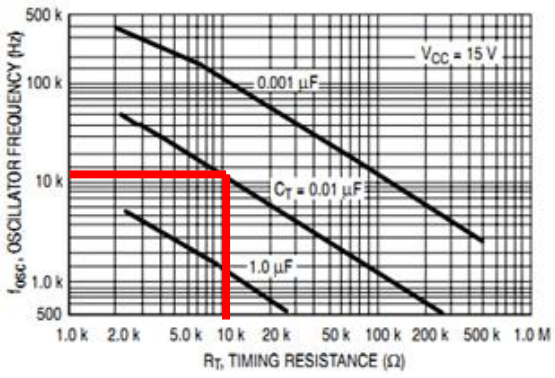
วงจรกำเนิดสัญญาณสัญญาณพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม. (P.W.M.) นี้ ได้เลือกใช้ที่ 10 กิโลเฮิร์ท เหตุผลในการเลือกความถี่ในย่านนี้ เพื่อต้องการให้กระแสของมอเตอร์มีริปเปิ้ลน้อย เราสามารถเลือกย่านความถี่ให้มีค่ามากกว่านี้ แต่ผลตามมาจะมีสัญญาณรบกวนมาก จากคู่มือของ MC 34060A จะหาค่าของ C_T และ ความต้านทาน R_T

คำนวณหาค่า R จากสูตร

$$R_T = \frac{1.1}{f_{ocs} C_T} \qquad (3.2)$$

พิจารณา C_T = 0.01 ไมโครฟารัด

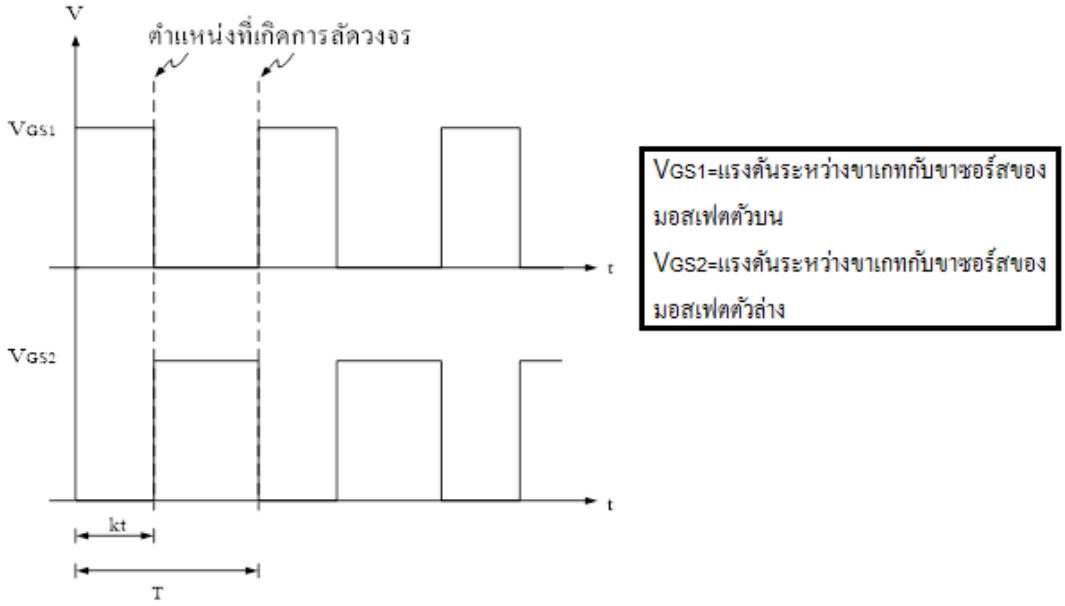
$$R_T = \frac{1.1}{10 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}} = 11 \text{ กิโลโอห์ม}$$



ภาพที่ 3.3 การกำหนดความถี่ของสัญญาณ PWM

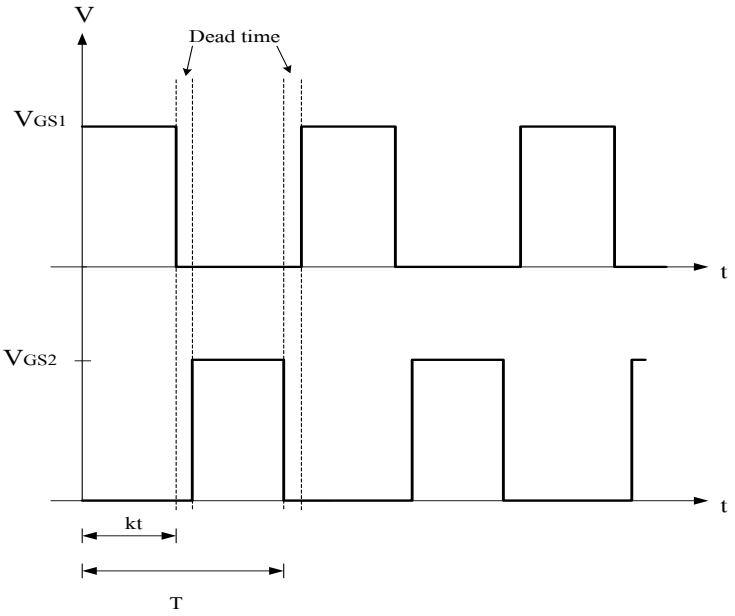
3.3 วงจร Shift Phase

เนื่องจากการออกแบบวงจรชอปเปอร์แบบ 2 ควอตแดรนท์นี้ จะเป็นการสั่งให้มอสเฟท 2 ตัว ที่ต่ออนุกรมกันสลับกันทำงาน ดังนั้นสัญญาณที่ควบคุมไอจีบีทีทั้งสองจะต่างกัน 180 องศา แต่จะเกิดปัญหาในช่วงการ เปิด – ปิด หรือ ณ เวลาที่ มอสเฟตเปลี่ยนสถานะจากนำกระแสไปเป็นหยุดนำกระแส หรือจากหยุดนำกระแสไปเป็นนำกระแส ซึ่งมอสเฟททั้งสองจะมีโอกาสที่จะนำกระแสพร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดการลัดวงจรดังภาพที่ 3.4

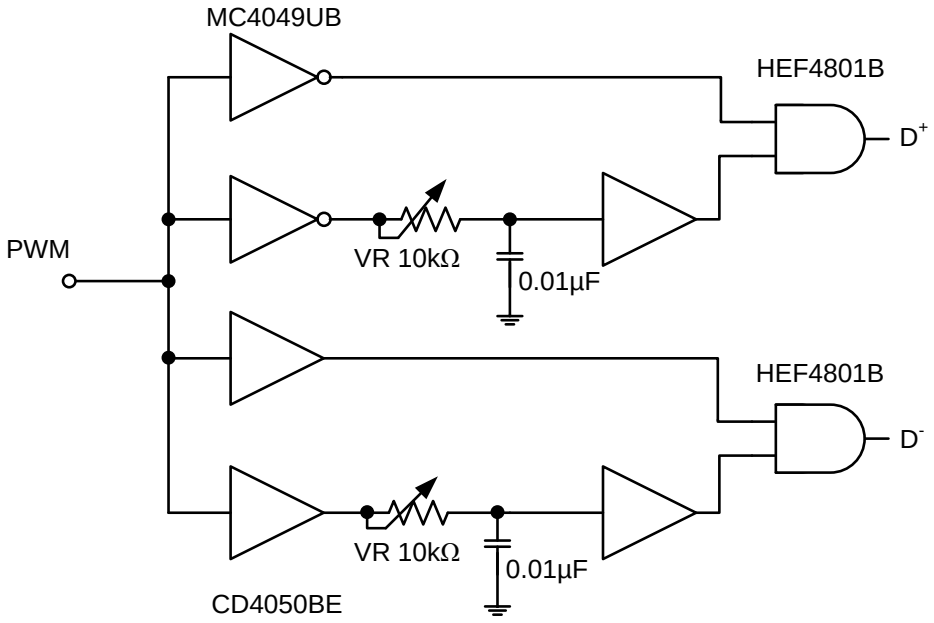


ภาพที่ 3.4 สัญญาณทริกเกทมอสเฟต ที่ยังไม่ผ่านการเลื่อนเฟส

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณทั้งสอง ให้มีการหน่วงเวลา(Dead Time) เพื่อไม่ให้มอสเฟตทั้งสองตัวทำงานพร้อมกัน ป้องกันการลัดวงจรดังภาพที่ 3.4

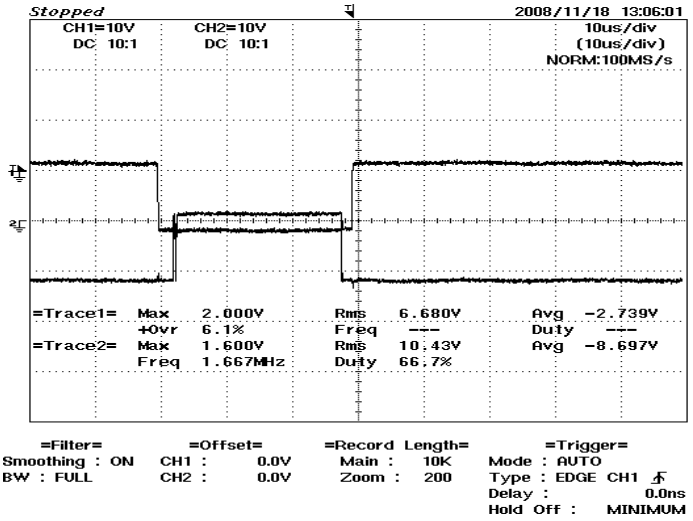


ภาพที่ 3.5 สัญญาณทริกเกทมอสเฟต ที่ผ่านการเลื่อนเฟสแล้ว



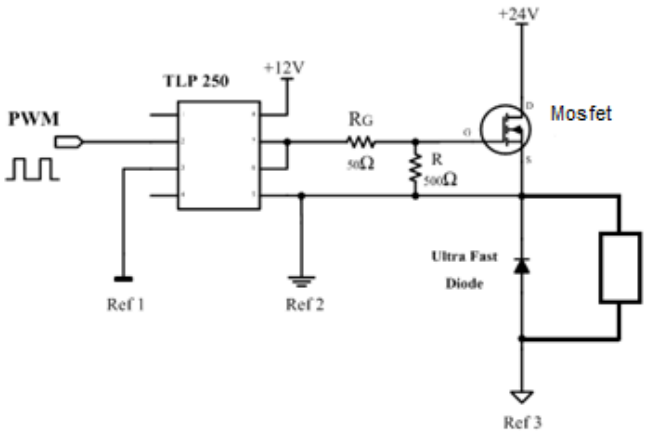
ภาพที่ 3.6 วงจร Shift Phase

เนื่องจากการออกแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงในที่นี้เป็นแบบ 2 ควอตแดนซ์โดยกำหนดให้ มอสเฟต (Mosfet) ทั้งสองตัวทำงานสลับกัน ดังนั้น เฟสของแรงดันควบคุม มอสเฟต (Mosfet) แต่ละตัวจะมีโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันได้ชั่วขณะทำให้เกิดลัดวงจรได้ ดังนั้นจึงได้ใช้วงจรเลื่อนเฟส (Phase shift) ของสัญญาณทั้งสองให้มีการหน่วงเวลาเพื่อป้องกันการลัดวงจร สัญญาณควบคุมมอสเฟต (Mosfet) ทั้ง 2 ตัว หลังจากได้ผ่านวงจรเลื่อนเฟส จะเห็นได้ว่าจะมีช่องว่างเล็กน้อยก่อนที่มอสเฟต (Mosfet) แต่ละตัวจะทำงาน ตามภาพแสดงวงจรเลื่อนเฟส โดยประยุกต์จาก IC.HEF 4081B IC.CD4050B และIC.CD14049UB สร้างวงจรเลื่อนเฟส



ภาพที่ 3.7 แสดงรูปสัญญาณพัลส์ที่ผ่านการเลื่อนเฟส

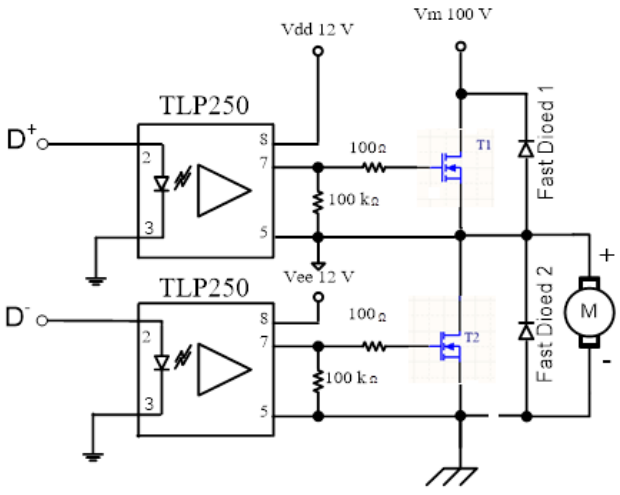
3.4 วงจร Gate Drive 1 ควอตแดนซ์



ภาพที่ 3.8 วงจรชอปเปอร์แบบ 1 ควอตแดนซ์

วงจรเกทไดร์แบบ 1 ควอตแดนซ์จะเปรียบเหมือนสวิตช์ที่มีวงจรขับเกทโดย TPL250 คอยทริกขาเกทให้ทำงาน

3.5 วงจร Gate Drive 2 ควอตแดนซ์



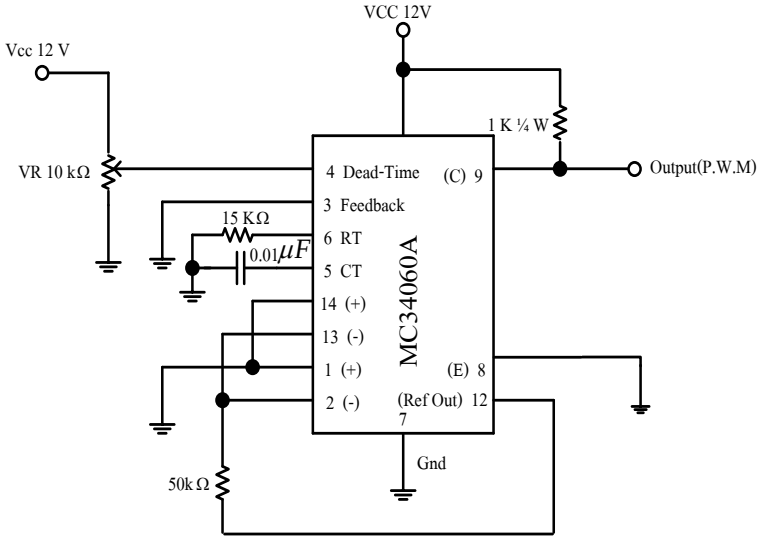
ภาพที่ 3.9 วงจร Gate Drive

เนื่องจากการออกแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงในที่นี้เป็นแบบ 2 ควอตแดนซ์โดยกำหนดให้ มอสเฟต (Mosfet) ทั้งสองตัวทำงานสลับกัน ดังนั้น เฟสของแรงดันควบคุม มอสเฟต (Mosfet) แต่ละตัวจะมีโอกาสที่จะทำงานพร้อมกันได้ชั่วขณะทำให้เกิดลัดวงจรได้ ดังนั้นจึงได้ใช้วงจรเลื่อนเฟส (Phase shift) ของสัญญาณทั้งสองให้มีการหน่วงเวลาเพื่อป้องกันการลัดวงจรสัญญาณควบคุมมอสเฟต (Mosfet) ทั้งสองตัว หลังจากได้ผ่านวงจรเลื่อนเฟส จะเห็นได้ว่าจะมีช่องว่างเล็กน้อยก่อนที่มอสเฟต (Mosfet) แต่ละตัวจะทำงาน ตามภาพแสดงวงจรเลื่อนเฟส โดยประยุกต์จาก IC.HEF 4081B IC.CD4050B และIC.CD14049UB สร้างวงจรเลื่อนเฟส

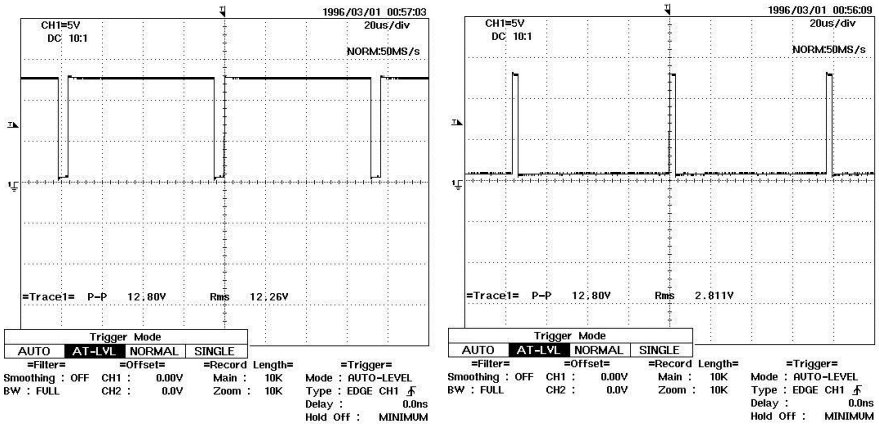
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลงวงจร PWM



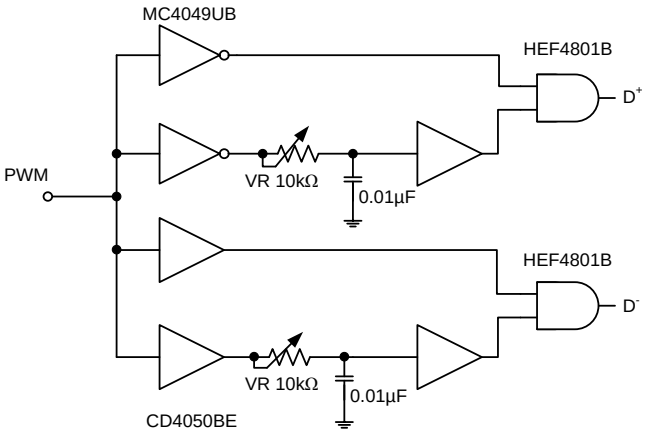
ภาพที่ 4.1 การต่อวงจรทดลอง



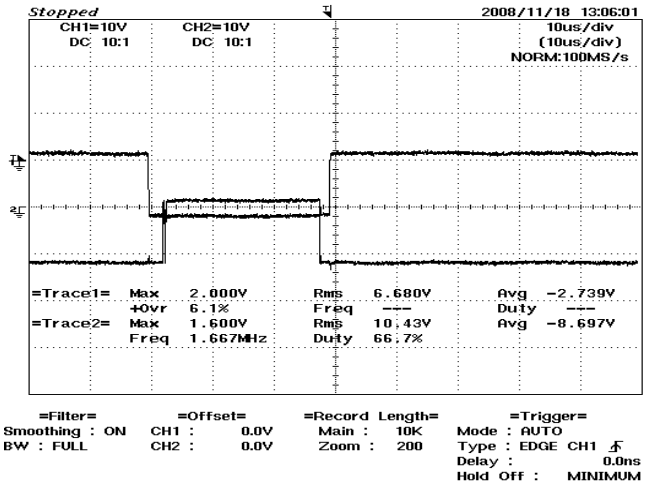
ภาพที่ 4.2 การปรับ Duty Cycle ของวงจร PWM

จากรูปแสดงให้เห็นถึงการควบคุมวงจร PWM โดยการปรับค่าความต้านทาน 10 kΩ ให้มีค่าน้อยสุด หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกาจนสุด จะทำให้เกิดคาวมถี่ที่มากกว่าดังภาพที่ 4.2 และเมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกาจนสุดจะทำให้ได้ความถี่ที่น้อยลงตามภาพที่ 4.2 ทางขวา เพราะเมื่อค่าความต้านทานน้อยจะได้ความถี่มากแต่เมื่อค่าความต้านทานมากจะได้ค่าความถี่น้อยลง

4.2 การทดลองวงจร Shift Phase



ภาพที่ 4.3 วงจร Shift Phase



ภาพที่ 4.4 แสดงสัญญาณที่ผ่านวงจร Shift Phase

จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่ถูงส่งผ่านวงจร Shift Phase จะมีแรงดันที่เลื่อนเฟสออกไปตามที่กำหนดไว้คือแรงดันเฟส 1 กับ 2 จะไม่ตรงกันเพื่อป้องกันการลัดวงจรของมอสเฟต

4.3 การทดลองวงจรชอปเปอร์

จากที่ได้ออกแบบตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอตแดนซ์แล้วนั้นในบทนี้จะนำตัวควบคุม และตัวขับเคลื่อนมอเตอร์มาทำการทดลองควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแตรง ขนาด 3 กิโลวัตต์ 48 โวลท์

การทดลองควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมจะทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังนี้

วัตถุประสงค์การทดลอง

1. ตรวจสอบสัญญาณเอาท์พุทของวงจร
2. ตรวจสอบการพุ่งเกินของสัญญาณ
3. สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้
4.สามารถเบรกแบบ Regenerative ได้

หัวข้อการทดลอง

1. ต่อวงจรตามภาพที่ 4.1 เข้ากับวงจรตามภาพที่ 4.3 และนำชุดปฏิบัติการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอตแดนซ์มาต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม ซึ่งภายในของชุดปฏิบัติการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอตแดนซ์จะประกอบด้วยชุดกำเนิดสัญญาณพี.ดับเบิ้ลยู.เอ็ม (P.W.M) วงจรเลื่อนเฟส (Phase shift) วงจรชอปเปอร์

2. ปรับความถี่ที่วงจร PWM เพื่อเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ โดยเริ่มจากมอเตอร์หยุดหมุนและเริ่มหมุนไปที่ความเร็วช่วง 25% 50% 75%

3.ลดความเร็วของมอเตอร์ โดยเริ่มจากมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงสุด เหลือ 75% และ 25% และหยุดหมุน

4. บันทึกสัญญาณแรงดันและสัญญาณกระแสที่ขั้วอาร์เมเจอร์ที่ Duty Cycie เท่ากับ 25% 50% และ 75%

4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง

4.4.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

ขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 กิโลวัตต์ 48 โวลท์ มีพิกัดตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลองมอเตอร์ตัวที่ 1

แรงดันพิกัด	48	โวลท์(V)
กระแสพิกัด	62	แอมป์(A)
ความเร็วรอบ	2,800	ความเร็วรอบ(rpm)
กำลังไฟฟ้า	3	กิโลวัตต์(kw)

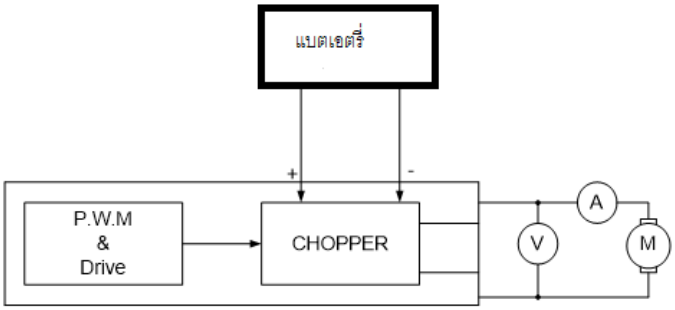
4.4.2 เครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. Power Supply)

- แบตเตอรี่ขนาด 48 โวลล์

4.4.3 เครื่องมือวัด

- ออสซิโลสโคป
- Amp meter
- เครื่องวัดความเร็วรอบ

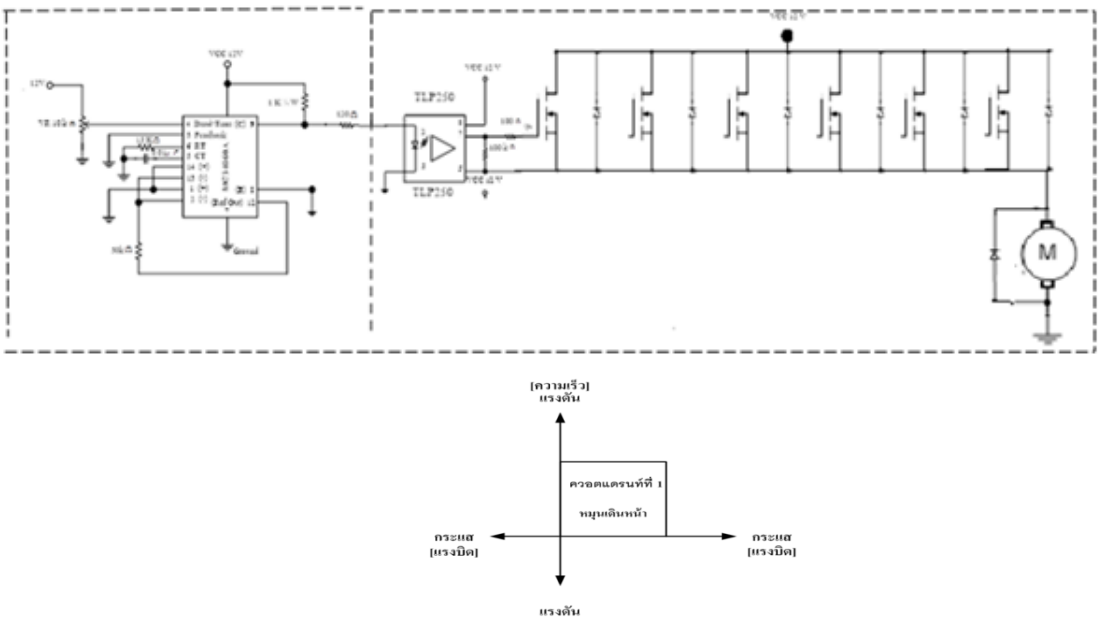
4.5 โครงสร้างของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม



ภาพที่ 4.5 แสดงโครงสร้างของการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

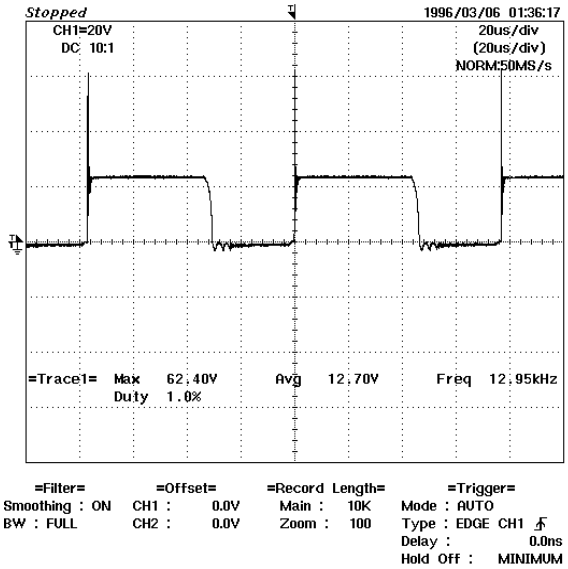
4.6 การทดลองวงจร 1 ควอตแดนซ์

PWM **Shift Phase**

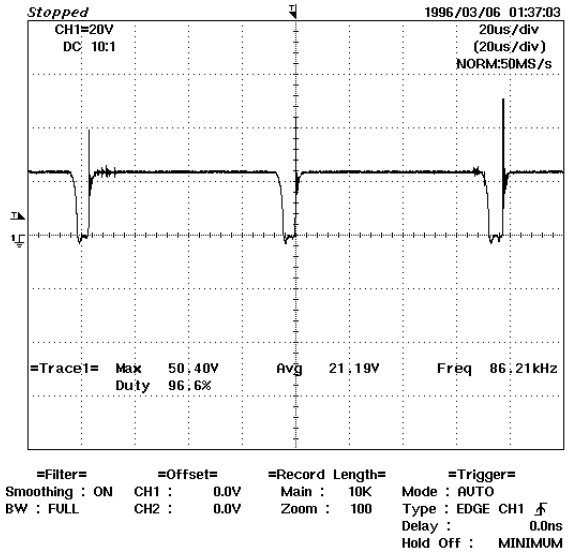


ภาพที่ 4.6 การทำงาน 1 ควอตแดนซ์

4.6.1 ผลการทดลอง 1 ควอตแดนซ์

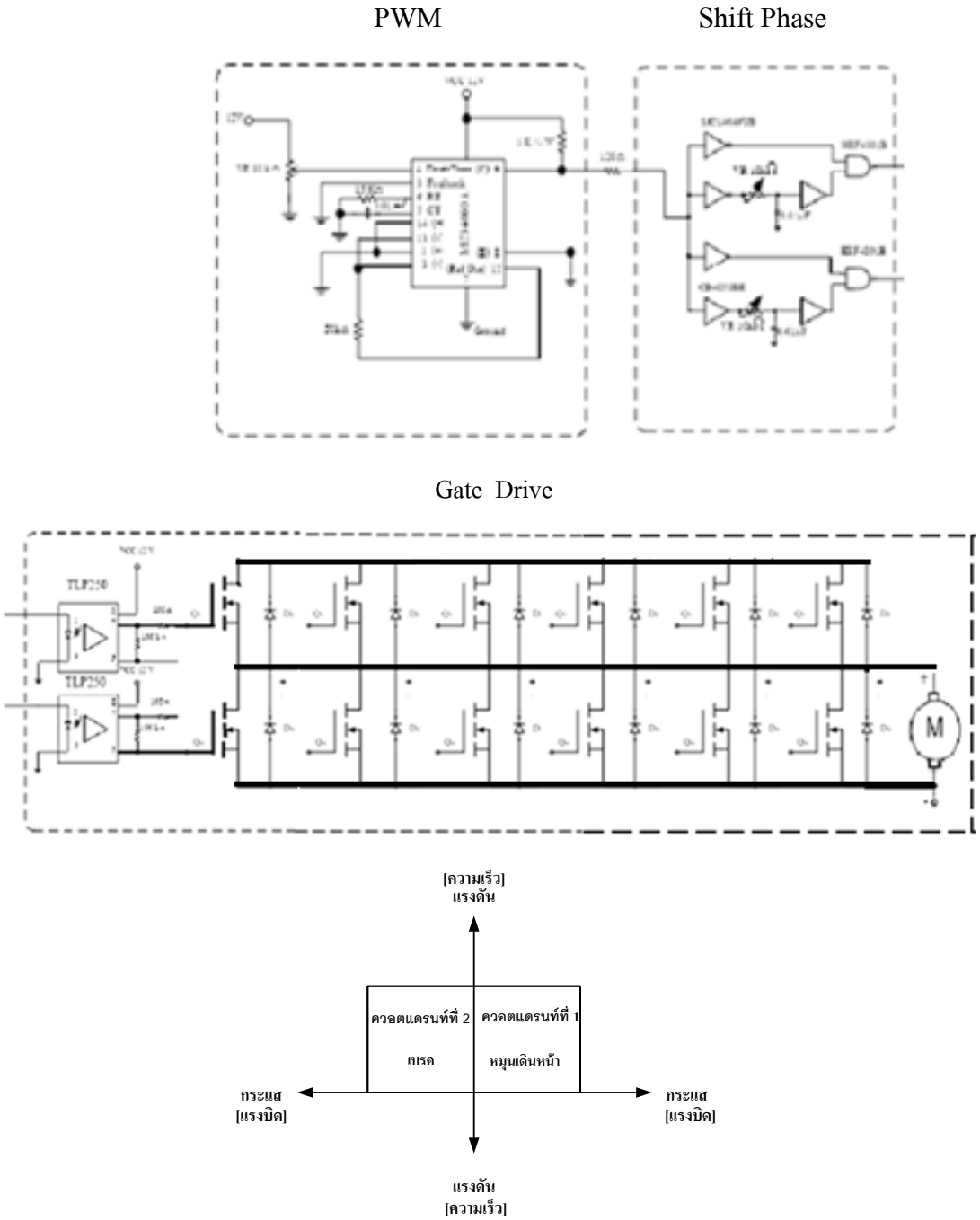


ภาพที่ 4.7 แสดงสัญญาณที่ขั้วมอเตอร์ที่ขนาดความกว้างของพัลส์ที่ 50%



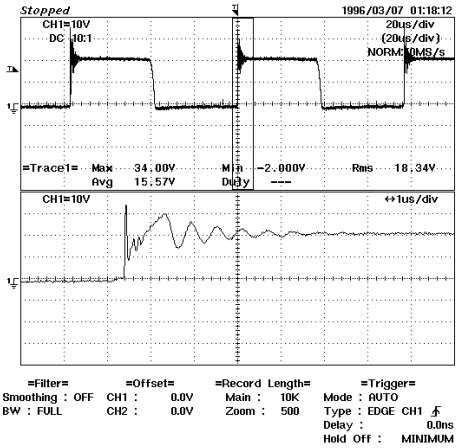
ภาพที่ 4.8 แสดงสัญญาณที่ขั้วมอเตอร์ที่ขนาดความกว้างของพัลส์ที่ 90%

4.7 การทดลอง 2 ควอตแดนซ์

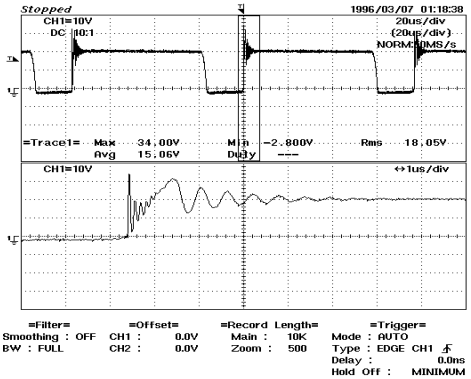


ภาพที่ 4.9 แสดงการทำงาน 2 ควอตแดนซ์

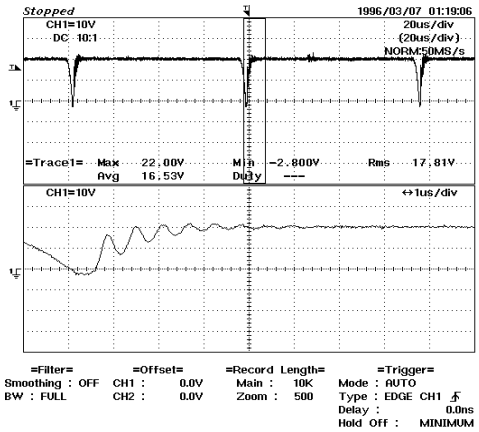
4.7.1 ผลการทดลอง 2 ควอตแดนซ์



ภาพที่ 4.10 แสดงสัญญาณที่ขั้วมอเตอร์ที่ขนาดความกว้างของพัลส์ที่ 50%



ภาพที่ 4.11 แสดงสัญญาณที่ขั้วมอเตอร์ที่ขนาดความกว้างของพัลส์ที่ 75%



ภาพที่ 4.12 แสดงสัญญาณที่ขั้วมอเตอร์ที่ขนาดความกว้างของพัลส์ที่ 90%

4.8 ตารางบันทึกผลการทดลอง

กำหนดให้แรงดันตกคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ เท่ากับ 48 โวลท์ (Vdc)

ตารางที่ 4.2 แสดงแรงดันตกคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์

Duty cycle	**Terminal Volltage**	**Speed(rpm)**
50 %	24	1365
75 %	36	2067
90 %	43	2512

จากตารางผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของพัลส์เพิ่มขึ้น แรงดันที่ตกคร่อมที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเป็นผลทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์(Speed)จะเพิ่มขึ้นตามลำดับไปจนถึงความเร็วพิกัดของมอเตอร์ ณ แรงดันที่จ่ายให้ 48 โวลท์กระแสตรง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากโครงงานชุดขับเคลื่อนรถกอล์ฟแบบ 2 ควอตแดนซ์เป็นการสร้างวงจรเพื่อใช้ทดแทนวงจรรถกอล์ฟที่มีราคาแพงและซ่อมบำรุงได้ยาก จากผลการดำเนินงาน ผู้จัดทำได้สร้างวงจรชอปเปอร์แบบ 2 ควอตแดนซ์ ขนาด 3000 W ที่ 48 V ที่สามารถขับเคลื่อนและกลับทางหมุนได้หรือหยุดทำงานและมีการเบรกแบบ Regenerative เป็นการเบรกที่มีประสิทธิภาพมาก เนื่องจากการใช้เส้นแรงแม่เหล็กย้อนกลับ ทำให้เกิดแรงบิดจากตัวมอเตอร์เวลาการหยุดจะขึ้นอยู่กับคาบเวลาคงที่ของมอเตอร์ และระดับของตัวควบคุมตัวสวิตชิ่ง ในควอตแดนซ์ที่สอง การเบรกนี้จะยิ่งช่วยคืนพลังงานของมอเตอร์ไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์อีกด้วย และวงจรที่สร้างขึ้นยังเป็นวงจรที่ใช้ได้สะดวกและสามารถสร้างขึ้นได้ง่ายกว่าวงจรของรถกอล์ฟจริง และมีราคาที่ถูกกว่ากันมากแต่สามารถใช้งานได้จริงและยังสามารถใช้เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสัญญาณชอปเปอร์

จากการที่ได้ทำการทดลองของแต่ละวงจรก็ทำงานได้ตามปกติแต่มีการเกิดสัญญาณรบกวนจากการวัดโดยใช้ ออสซิโลสโคป เป็นตัววัด การแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนได้โดยการนำวงจรสนับเบอร์มาช่วยเพื่อให้มีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุด

ในการพัฒนาอาจจะประยุกต์ตัวควบคุมแบบลูปปิดไม่ว่าจะใช้ตัวควบคุมจากไอซีเชิงเส้นหรือระบบดิจิตอลก็สามารถดำเนินการได้อย่างปลอดภัย ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าคงได้รับประโยชน์จากชุดตัวขับเคลื่อนรถกอล์ฟชุดนี้ในการใช้งานและเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาในขั้นสูงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] นิมิต บุญภิรมย์, “ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ”, เอกสารประกอบการสอนวิชา EEG442, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[2] 202.28.32.233/pics_upload/บทที่%208%20มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.pdf

[3] pdf.**datasheet**catalog.com/**datasheet**/.../MC33060AD.pdf

[4] www.ee.mut.ac.th/home/prasoot/final_thesis/.../บทที่3%20final.doc